

электрич. полем ускоряющих станций 4, размещённых в промежутке между электромагнитами 5, к-рые поворачивают и фокусируют частицы в поперечных направлениях (бетатронные колебания). Эти магниты расположены по кольцу в определённом порядке. Система

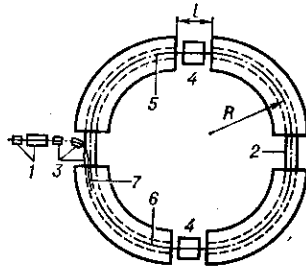


Рис. 1. Схема протонного синхротрона: 1 — инжектор; 2 — вакуумная камера; 3 — устройство ввода; 4 — ускоряющие электроды; 5 — электромагниты; 6 — равновесная орбита; 7 — пучок частиц.

электромагнитов 5 обеспечивает также устойчивость продольных синхротронных колебаний (радиально-фазовых). Траектории частиц в С. п. с точностью до неск. см совпадают с идеальной равновесной орбитой 6.

Индукция поля в электромагнитах B , импультсы ускоряющих частиц p и радиус кривизны их траектории R связаны между собой соотношением $pc = eBR$, к-рое в удобных для практич. применения единицах имеет вид:

$$pc[\text{МэВ}] = 300B[\text{Тл}] \cdot R[\text{м}]. \quad (1)$$

Это соотношение определяет геом. размеры С. п., к-рые у совр. ускорителей измеряются километрами. Частота ускоряющего поля $\omega_{\text{вч}}$ должна быть кратна частоте обращения частиц в ускорителе

$$\omega = qv/L, \quad (2)$$

где v — скорость частиц, L — длина их траектории, к-рая практически всегда может быть заменена длиной равновесной орбиты, т. е. длиной такой замкнутой кривой, к-рая принадлежит к числу возможных траекторий движения частиц с данным импульсом. Целое число q наз. кратностью ускоряющего поля. Ф-ла (1) показывает, что индукция магн. поля в С. п. должна увеличиваться вместе с импульсом частиц. Для сокращения размеров и экономии электроэнергии в ускорителях на большие энергии всё шире начинает применяться сверхпроводимость. Частота ускоряющего поля должна увеличиваться вместе со скоростью частиц и в течение ускоряющего цикла может изменяться в неск. раз (она постоянна только при ускорении релятивистских частиц).

На рис. 2 изображена типичная зависимость B и ω от времени. Эта зависимость обычно носит периодич.

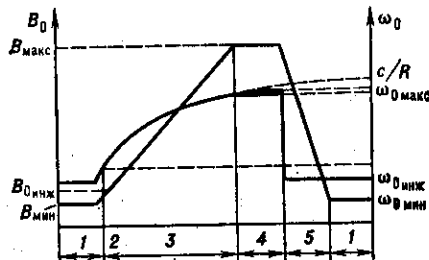


Рис. 2. Рабочий цикл протонного синхротрона: 1 — пауза; 2 — инжекция; 3 — ускорение; 4 — медленный вывод; 5 — спад поля.

характер (в совр. С. п. возможны и более сложные режимы) и называется рабочим циклом (или ц и к л о м у с к о р е н и я). После паузы 1 магн. поле начинает возрастать и при подходящем его значении происходит

инжекция 2, в течение к-рой вакуумная камера С. п. заполняется частицами, поступающими от предварит. ускорителя. В С. п. на умеренную энергию ($\approx \text{ГэВ}$) в качестве инжекторов обычно используются резонансные линейные ускорители; в С. п. на высокую и сверхвысокую энергию широко применяют каскадные схемы, в к-рых инжектором основного С. п. является небольшой С. п. — б у с т е р. Под действием ускоряющего ВЧ-поля инжектируемые частицы группируются в q сгустков; при этом теряется часть пучка, оказавшаяся вне сепаратрис, ограничивающих области устойчивости продольных колебаний. Захваченные в режим ускорения частицы ускоряются ВЧ электрич. полем, частота к-рого в соответствии с ф-лами (1) и (2) синхронизуется с магн. полем системами автоподстройки ко пучку. Во время захвата и ускорения 3 частицы могут быть потеряны под действием ряда факторов: рассеяния на остаточном газе, влияния возмущений магн. и ускоряющего полей, коллективных эффектов, вызванных соств. полем пучка, его взаимодействием со стенками вакуумной камеры и т. д. После окончания стадии ускорения частицы выводятся (4) из С. п. и направляются пользотателям: для физ. экспериментов, инжекции в др. ускоритель и т. д. В связи с тем что детекторы имеют ограниченную скорость счёта, на совр. С. п. широко используются схемы медленного вывода, растягивающие процессы вывода частиц до неск. секунд или более. Индукция магн. поля в течение медленного вывода не меняется (выходит «на площадку»).

Совр. С. п. представляет собой сложное инженерное сооружение, включающее целый ряд техн. систем: магн. систему, систему ускорения, вакуумную систему, системы инжекции и вывода, систему диагностики пучка, систему контроля и управления и т. д. Рассмотрим кратко две осн. системы: магнитную и систему ускорения.

Магнитная система обеспечивает поворот и фокусировку частиц. Жёсткость фокусировки определяется бетатронными частотами Q_r и Q_z — числом поперечных (радиальных и аксиальных) колебаний на оборот (см. Бетатрон). В соответствии с историч. традицией различают С. п. со слабой фокусировкой (в старой отечеств. литературе — синхрофазотроны), у к-рых Q_r и $Q_z < 1$, и С. п. с сильной фокусировкой ($Q > 1$) (см. Фокусировка частиц в ускорителе). Для создания сильной фокусировки применяются магниты, у к-рых градиент магн. поля многократно меняет знак (см. Знакопеременная фокусировка). В качестве элементов магн. системы используются либо магниты с совмещёнными ф-циями, в к-рых создаётся магн. поле, имеющее как поворачивающую B_z , так и фокусирующую $\partial B_z/\partial r$ составляющие, либо магниты с разделёнными ф-циями, т. е. дипольные поворачивающие магниты без градиента ($\partial B_z/\partial r = 0$), и квадрупольные фокусирующие линзы, не имеющие поворота магн. поля ($B_z = 0$).

Магниты в ускорителях объединяют в периодич. группы сложной конфигурации (периоды и суперпериоды магн. системы); иногда в С. п. на сверхвысокую энергию применяются и непериодич. группы («вставки»), в к-рых размещаются спец. системы для исследования встречных пучков, мощные ускоряющие системы, системы аварийного вывода пучка и т. д. Магн. система включает также элементы (в виде отд. магнитов, дополнит. обмоток, шимм и т. д.) для коррекции возмущений магн. поля на орбите, вызванных систематич. или случайными ошибками в поле магнитов, ошибками их установки и т. д. Погрешности магн. систем становятся особенно заметными, если числа бетатронных колебаний Q_r и Q_z приближаются к целым (резонансное влияние погрешностей в индукции магн. поля) и полуцелым значениям (погрешности в величине $\partial B_z/\partial r$).

Ускоряющая система обеспечивает ускорение частиц, а также устойчивость синхротронных (радиально-фазовых) колебаний импульса и продольной координаты